DOI: 10.22067/jfcei.2022.72939.1070
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰ *

مقاله پژوهشی

افشار یوسفی عباسعلیلو(۱)   وشیار محمدحسن(۲)   علیرضا سقایی(۳)   پویان ایار(٤)   محمود عامری(٥)

چکیده *در این تحقیق به ارزیابی تأثیر استفاده از افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰ به‌عنوان مواد افزودنی ضد عریان شدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی داغ پرداخته‌شده است. بدین منظور از آزمایش‌های مکانیکی مختلف نظیر خزش دینامیکی، آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش خمش نیم دایره‌ای در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که همه‌ی افزودنی‌های مورداستفاده در این تحقیق مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر شیار شدگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش دادند. به‌طوری‌که مخلوط آسفالتی حاوی افزودنی تراگریپ نسبت به بقیه‌ی افزودنی‌های مورداستفاده در این تحقیق، با افزایش ٤۳ درصدی مقاومت در برابر شیار شدگی و ٤۹/٦ درصدی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بیشترین مقاومت را در برابر ترک‌خوردگی و شیار شدگی از خود نشان داده است. همچنین مخلوط آسفالتی حاوی وتمول-۹۵۰ با ۲۵ درصد افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی بیشترین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را از بین افزودنی‌های مختلف این تحقیق نشان داده است. از طرف دیگری نتایج آنالیز همبستگی بین نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که بین برخی آزمایش‌های انجام شده همبستگی و ارتباط بیشتری وجود دارد. به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین پارامتر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مدول برجهندگی در حالت تر و خشک (TSR و RMR) با ۰/۹۷٤ بیشترین همبستگی را بین پارامترهای مختلف آزمایش‌های عملکردی دارد.*

واژه‌های کلیدی مخلوط آسفالتی داغ، افزودنی‌های ضد عریان شدگی، خزش دینامیکی، مدول برجهندگی، آزمون خمش نیم‌دایره‌ای.

مقدمه

به‌منظور ارزیابی عریان شدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از روش‌ها و آزمایش‌های متعددی از قبیل: لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283)، آزمایش ویل ترک (Wheel Tracking Test)، مدول برجهندگی، روش‌های انرژی بر پایه نظریه انرژی آزاد سطحی(Surface Free Energy) بین قیر و سنگدانه استفاده می‌شود [5–1]. حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر نوع قیر و خصوصیات شیمیایی قیر، میزان پیرشدگی قیر، نوع مصالح سنگی، دانه‌بندی مصالح سنگی و دمای اختلاط و دمای تراکم مخلوط‌های آسفالتی و سایر اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مخلوط‌های آسفالتی قرار بگیرد [10–6]. نفوذ رطوبت به مخلوط آسفالتی می‌تواند باعث کاهش دوام و عریان شدگی، جمع شدگی و چاله‌شدگی روسازی‌های آسفالتی شده و خرابی‌های نظیر شیار شدگی و ترک‌های ناشی از خستگی را نیز به وجود بیاورد [11,12]. همواره به‌منظور افزایش دوام و مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی، آهک هیدراته و پلیمر بیشتر موردتوجه بسیاری از محققان صنعت آسفالت قرارگرفته است [16–13]. افزودنی مایع ضد عریان شدگی با تغییر خواص سطح مصالح سنگی و بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی باعث افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی و عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند [17,18].

عامری و همکارانش در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۷/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۱۸ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
(۲) کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.
(۳) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
(٤) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
(٥) استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
Email: ayar@iust.ac.ir

زایکوترم (Zycotherm) و ایوانیک (Evonik) و آهک هیدراته به‌عنوان افزودنی‌های ضد عریان شدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های لاتمن اصلاح‌شده و آب جوشان، آزمایش خزش دینامیکی و مدول برجهندگی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودنی‌های مختلف مورداستفاده در این تحقیق تأثیر مثبتی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته و مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را افزایش داده است. به‌طوری‌که استفاده از زایکوترم نسبت به بقیه‌ی افزودنی‌ها بیشترین تأثیر بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را داشته است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از آهک هیدراته بیشترین تأثیر بر مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی را داشته است [19]. نخعی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی حاوی وکس‌های اتیلن بی استارآمید (Ethylene-Bis-Stearamide) و پلی‌اتیلن(Polyethylene) در برابر حساسیت رطوبتی با مصالح سنگی مختلف و در دمای تولید مختلف با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده پرداختند. نتایج نشان داد که اتیلن بی استارآمید مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر حساسیت رطوبتی بهتر کرده است. از طرفی همچنین نتایج نشان داد که تأثیر پلی‌اتیلن بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بستگی به دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی داشته است. به‌طوری‌که در دماهای بالای تراکم، تأثیر عکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته است [20]. کاراهانسر و همکارانش به ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳ و ۵ درصد وزن قیر خالص از آلومینیم اکسید (Al_2O_3) و ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد پودر نانو سیلیکا (SiO_2NP) با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده پرداختند. نتایج نشان داد که از بین مخلوط‌های انتخاب‌شده، مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با ۰٫۳ درصد نانو سیلیکا و ۳ درصد آلومینیم اکسید بیشترین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را داشته و افزایش درصد استفاده از این افزودنی‌ها، مقاومت در برابر عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش داده است [21]. در سال ۲۰۱۹ ارباب پور بیگدلی و همکارانش به‌منظور ارزیابی تأثیر تراشه بتن، فیلر آهکی، سیمان پرتلند و پودر سنگ سیلیسی به‌عنوان مصالح فیلر در مخلوط‌های آسفالتی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تحت سیکل‌های ذوب و یخ متعدد (۱، ۳، ٦، ۱۰)، از آزمایش‌های مدول بر جهندگی و تنش کششی غیرمستقیم به‌عنوان آزمایش‌های مکانیکی و آزمایش انرژی آزاد سطحی به‌عنوان رویکرد ترمودینامیکی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط‌های آسفالت حاوی فیلر از نوع سیمان پرتلند نسبت به سایر فیلر های مورداستفاده در این تحقیق ازنظر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی در تمام سیکل‌های ذوب و یخ عملکرد بهتری را نشان می‌دهند [22]. همچنین در سال ۲۰۲۰ عامری و همکارانش با استفاده از رویکرد انرژی آزاد سطحی و پارامترهای ترمودینامیکی تأثیر افزودنی‌های زایکوترم، وتمول–۹۵۰ ، گریپر، اوونیک و تراگریپ را بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های اسفالتی را ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودنی‌های مورداستفاده با افزایش مقدار انرژی لازم برای پیوستگی و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را افزایش داده است که از بین افزودنی‌های مورداستفاده زایکوترم و وتمول–۹۵۰ بیشترین مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را نسبت به سایر افزودنی‌های مورداستفاده داشته است [23].

هرچند استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی می‌تواند مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر عریان شدگی افزایش دهد ولی می‌تواند بر بقیه‌ی پارامترها و خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرهای مختلفی داشته باشد. بنابراین شناخت و درک رفتار افزودنی ضد عریان شدگی در مخلوط‌های آسفالتی و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی یک پیش‌نیاز اساسی جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر خرابی عریان شدگی و سایر خرابی‌های نظیر شیار شدگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی هست.

در این پژوهش، تأثیر سه نوع افزودنی ضد عریان شدگی مختلف (گریپر، تراگریپ و وتمول–۹۵۰) بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، آزمایش مکانیک شکست، و تنش کششی غیرمستقیم مورد ارزیابی قرارگرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مصالح مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی

در این قسمت، مصالح مورداستفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی، قیر و مواد افزودنی ضد عریان شدگی مورداستفاده معرفی می‌شوند.

مصالح سنگی. در این پژوهش از مصالح سلیسی تهیه‌شده از کارخانه آسفالت شرکت هادیپی واقع در شهر تهران با حداکثر

اندازه‌ی اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده گردیده است. ویژگی‌های مصالح با معیارهای آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران (نشریه ۲۳٤) کنترل شد.

دانه‌بندی مصالح سنگی. در این پژوهش مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی با توجه به استاندارد و محدودیت‌های طرح اختلاط روسازی ممتاز مطابق SHRP A-407, SHRP A-410 و با حداکثر اندازه‌ی اسمی برابر با ۱۹ میلی‌متر انتخاب‌شده‌اند همچنین در این مطالعه از مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰ همین مصالح به‌عنوان فیلر انتخاب گردیده است [24, 25].

قیرمصرفی. در این پژوهش از قیر ٦۰/۷۰ شرکت نفت پاسارگاد برای ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده‌شده است.

افزودنی ضد عریان شدگی. در این پژوهش از ۳ نوع از افزودنی ضد عریان شدگی مختلف (گریپر، تراگریپ و وتمول–۹۵۰) به‌منظور بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی به‌خصوص مقاومت در برابر خرابی ناشی از حساسیت رطوبتی مورداستفاده قرارگرفته است.

گریپر یک استر آلی با ساختار RCO_2R' است که در آن R و ´R هیدروکربن‌های موجود در استر هستند. این افزودنی با ایجاد یک پیوند کووالانسی قوی بین قیر و مصالح سنگی باعث افزایش نیروی پیوستگی و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی‌شده و از عریان شدگی مخلوط آسفالتی جلوگیری می‌کند. از طرفی تراگریپ و وتمول، عامل‌های دارای آلکیل آمید و پلی آمین هستند که به دلیل ایجاد واکنش قوی با سطح اسیدی بخصوص مصالح سنگی سلیسی یک سطح آب‌گریز در سطح مصالح سنگی ایجاد کرده و باعث افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی می‌شوند[26]. زنجیر هیدروکربنی بلند موجود در آمین‌ها سازگار با قیر بوده و با ایجاد یک یون آمینی $R\text{-}NH_3$ با بار مثبت (کاتیونی) در حضور آب می‌تواند نقش یک پل ارتباطی بین سنگدانه های آب‌دوست و قیر آب‌گریز را برای ایجاد پیوند قوی بین آن‌ها داشته باشد[27]. پس از بررسی پژوهش‌های انجام‌شده و پیشنهادهای شرکت‌های تولیدکننده‌ی مواد، مقدار استفاده از هر نوع افزودنی‌ها تعیین گردید. در جدول (۱) خواص فیزیکی و مقادیر استفاده از مواد ضد عریان شدگی بیان‌شده است.

جدول ۱ خواص فیزیکی افزودنی‌های استفاده‌شده

نوع افزودنی	درصد استفاده (نسبت به وزن کل قیر)	خواص فیزیکی
گریپر (GRIPPER® L)	٪۰/٤	حالت فیزیکی: مایع
		رنگ: زرد
		ویسکوزیته (20°C): ۲,۵ پاسکال ثانیه
		چگالی (gr/cm^3 at 20°C): ۱,۰۲
		نقطه نرمی: بیشتر از ۱۵۰
تراگریپ (TeraGrip)	٪۰/٤	حالت فیزیکی: مایع
		رنگ: عسلی
		چگالی (gr/cm^3 at 20°C): ۰,۹٤–۰,۹٦
		نقطه نرمی: بیشتر از ۱۵۰
وتمول–۹۵۰ (WETMUL-950)	٪۰/۵	حالت فیزیکی: مایع
		رنگ: قهوه‌ای
		چگالی (gr/cm^3 at 20°C): ۰,۹٤–۰,۹٦
		حلالیت در آب: قابلیت حلالیت ندارد.
		حلالیت در هیدروکربن: محلول

تعیین درصد قیر بهینه و ساخت مخلوط‌های آسفالتی

در این پژوهش، به‌منظور آماده کردن قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های ضد عریان شدگی، افزودنی‌ها در مدت ۱۵ دقیقه به قیر خالص با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد اضافه گردید. پس از اصلاح قیر با افزودنی‌های ضد عریان شدگی، به‌منظور تعیین میزان قیر بهینه در مخلوط آسفالت از روش طرح اختلاط روسازی ممتاز با سطح ۱ و با درنظرگرفتن ترافیک بیش از ۱۰ میلیون و کمتر از ۳۰ میلیون (سطح ٥ از سطوح ترافیک) و حداکثر دمای ٤۱–۳۹ درجه سانتی‌گراد استفاده‌شده است. وزن مصالح سنگی موردنظر، ۱۲۰۰ گرم و دارای درصد قیرهای ٤/٥ تا ٦ درصد (با اختلاف مقدار ٥/ ۰ درصد) بودند که از هرکدام سه نمونه تهیه‌شده است. قبل از ساخت نمونه‌های آسفالتی مصالح سنگی به مدت ٢٤ ساعت در دمای ١٥٥ درجه سانتی‌گراد و قیر به مدت ١ ساعت در دمای ١٤٥ درجه‌ی سانتی‌گراد در آون قرارداده شدند. به‌منظور تراکم نمونه‌های ساخته‌شده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری بجای روش تراکم مارشال با واردکردن همزمان یک نیروی استاتیکی و نیروهای برشی ناشی از دوران قالب حول راستایی قائم، عمل ورز دادن و تراکم مخلوط آسفالتی استفاده‌شده است. مقدار دوران طرح (N_d) برای تراکم نمونه‌ها با استفاده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری بر اساس سطح ترافیک و حداکثر دمای هفت روز در محل اجرای پروژه روسازی برابر ۱۲۱ انتخاب‌شده است [25].

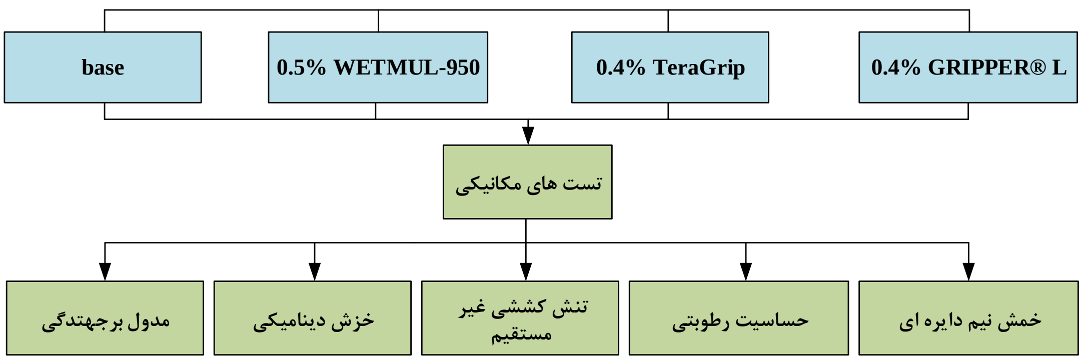
قیر بهینه برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی موردنظر بر اساس استاندارد روسازی ممتاز (AASHTO M323)، جهت تعیین میزان ، درصد قیر استفاده‌شده در مخلوط آسفالتی که در آن درصد فضای خالی مخلوط در تعداد دوران طرح مخلوط (که در این تحقیق، تعداد دوران برابر ۱۲۱ در نظر گرفته‌شده است) برابر ٤ درصد بوده و شرایط لازم طبق آیین‌نامه روسازی ممتاز برای مقدار درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد فضای خالی پرشده با قیر (VFA) و نسبت گردوخاک (Dust proportion) را داشته باشد، به‌عنوان درصد بهینه قیر مخلوط آسفالتی تعریف می‌شود [24,28]. در جدول (۲) نتایج پارامترهای حجمی برای مخلوط آسفالتی حالت پایه بیان‌شده است.

جدول ۲ نتایج پارامترهای حجمی برای مخلوط‌های آسفالتی

پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی	نتایج	محدوده روسازی ممتاز
V_a (%)	٤	٤
Pb (%)	٥/۳۰	---
VMA (%)	١٦/٣٣	>۱۳٪
VFB (%)	٦٩/٢٠	٦٥٪–٧٥٪
نسبت گردوخاک	١/١٧	۰/١–٦/٢
Gmm (g/cm^3)	٢/٣١٦	–

برنامه‌ی آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آ سفالتی، آزمایش تنش کششی غیرمستقیم، نسبت تنش‌های کششی غیرمستقیم در حالت تر و خشک، مدول برجهندگی در حالت تر و خشک و آزمایش شکست خمش نیم دایره‌ای در دمای متوسط انجام گرفت. که در شکل (۱) برنامه آزمایشگاهی این تحقیق نشان داده‌شده است.



شکل ۱ برنامه آزمایشگاهی مورداستفاده در این پژوهش

خزش دینامیکی

در این تحقیق از آزمایش خزش دینامیکی و پارامتر عدد جریان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خروجی‌های آزمایش خزش دینامیکی برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌های ضد عریان شدگی بر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است. به‌منظور انجام این آزمایش از دستگاه UTM -5P و بارگذاری برابر با ٤١٤ کیلو پاسکال به‌صورت سینوسی و سیکل ۰/۵ و ۱/۵ ثانیه بارگذاری و باربرداری بر روی نمونه‌های صورت گرفت. قبل از انجام آزمایش نمونه‌های آزمایش خزش دینامیکی به مدت ۵ ساعت در دمای ٥٤/٤ درجه‌ی سانتی‌گراد قرارداده شدند.

نمودار تعداد سیکل بارگذاری به مقدار کرنش تجمعی به‌عنوان خروجی دستگاه آزمایش خزش دینامیکی که در شکل (۲) نمایش داده‌شده است از سه ناحیه‌ی مشخص ناحیه‌ی اولیه (۱) ثانویه (۲) ناحیه سوم (۳) تشکیل‌شده است که افزایش سریع مقدار کرنش تجمعی در ناحیه‌ی اول رخداده و با ورود به ناحیه‌ی دوم از مقدار سرعت افزایش کرنش تجمعی کاسته شده و نمودار شیب ثابتی به خود می‌گیرد. سپس با ورود به ناحیه‌ی سوم دوباره مقدار کرنش تجمعی افزایش می‌یابد که به تعداد سیکلی که نمودار در آن تعداد سیکل به ناحیه سوم وارد می‌شود به‌عنوان عدد روانی(Flow Number) به‌حساب می‌آید. در این پژوهش برای به دست آوردن عدد روانی طبق رابطه زیر از مدل فرانکین استفاده‌شده است [29].

$$\varepsilon_p = An^B + C(e^{Dn} - 1) \quad (۱)$$

در این رابطه ε_p برابر با مقدار کرنش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری مختلف بوده و ضرایب A, B, C,D نیز ضرایب ثابتی هستند.

مقدار عدد روانی برای نمونه‌های مختلف مخلوط آ سفالتی با دو بار مشتق‌گیری از معادله‌ی فرانکین و تعداد سیکل بارگذاری که در آن مشتق دوم معادله‌ی فرانکین از منفی به مثبت تغییر کند طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\varepsilon_p}{dn} = ABn^{B-1} + CDe^{Dn} \quad (۲)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dn^2} = AB(B-1)n^{B-2} + CD^2e^{Dn} \quad (۳)$$

$$ITS = \frac{2P}{\pi.D.t} \quad (٤)$$

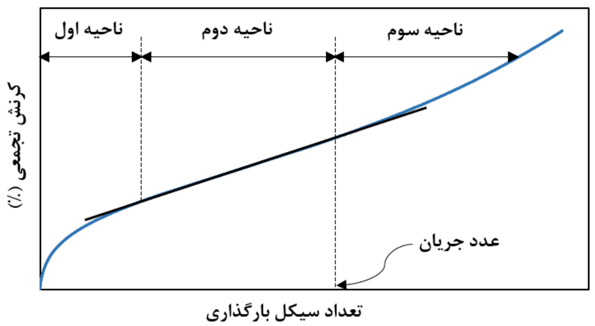
تنش کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش تنش کششی غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO T 283 استفاده می‌گردد. مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

در این رابطه‌ی P برابر با حداکثر نیروی وارد بر نمو نه (kN)، t و D برابر باضخامت و قطر نمونه‌های آسفالت برحسب mm هستند.

نسبت تنش کششی غیرمستقیم نیز از تقسیم متوسط مقدار تنش کششی غیرمستقیم حالت تر به خشک طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{تر}}}{ITS_{\text{خشک}}} \times 100 \quad (٥)$$



شکل ۲ نمودار تعداد سیکل بارگذاری- کرنش تجمعی نمودار خزش دینامیکی [29]

مدول برجهندگی و نسبت مدول برجهندگی Resilient (Modulus Ratio)

به‌منظور طراحی و تعیین ضخامت روسازی‌های آسفالتی از نتایج آزمایش مدول برجهندگی استفاده می‌شود. هر چه مقدار مدول برجهندگی برای یک مخلوط آسفالتی بیشتر باشد. مقدار، ضخامت محاسبه‌شده برای روسازی کمتر خواهد بود. این آزمایش طبق آیین‌نامه ASTM D4123 و در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و تحت فرکانس ۱ هرتز و بارگذاری سینوسی بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد. مقدار مدول برجهندگی نمونه‌ها آسفالت طبق رابطه‌ی (٦) محاسبه می‌شود.

$$M_R = \frac{(\nu+0.2734)P}{tH} \quad (٦)$$

در این رابطه v, P, t و H به ترتیب ضـــخامت نمونه‌ها برحســـب میلی‌متر، نیروی وارد بر نمونه‌ها، نســبت پواســـون و میزان تغییر شـکل برگشـت‌پذیر اسـت که در این تحقیق مقدار پواســون برابر ۰/۳۵ و مقدار بار وارده برابر ٤۰۰ نیوتون در نظر گرفته‌شده است.

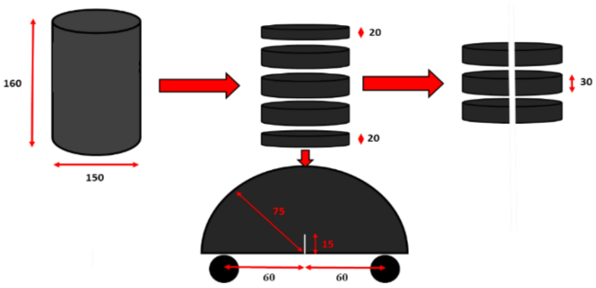
همچنین در این پژوهش طبق رابطه‌ی زیر از نسبت مدول برجهندگی در حالت تر و خشک نیز برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است. شرایط عمل‌آوری نمونه‌های حالت تر آزمایش مدول برجهندگی دقیقاً مانند شرایط عمل‌آوری نمونه‌های تر آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بوده است.

$$RMR = \frac{M_{\text{تر}}}{M_{\text{خشک}}} \times 100 \qquad (۷)$$

خمش نیم‌دایره‌ای (SCB)

ترک‌خوردگی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی در دمای متوسط و پایین است. در این تحقیق از آزمایش خمش نیم دایره‌ای به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های ارزیابی مقاومت مخلوط‌های اسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در دمای متوسط استفاده‌شده است [29–32]. نمونه‌های خمش نیم دایره‌ای دارای قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر است. برای تهیه‌ی نمونه‌های SCB ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۱٦۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر طبق آیین‌نامه‌ی ASTM D 8044-16 تهیه‌شده و سپس نمونه‌های دیسکی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر از آن برش داده می‌شود. سپس نمونه‌های دایره‌ای به‌دست‌آمده به دو نمونه‌ی نیم دایره‌ای برش داده‌شده و در وسط آن ترکی به طول ۱۵ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر ایجاد می‌شود. در شکل (۳) و (٤) به ترتیب مراحل آماده سازی و و نحوه ی قرارگیری نمونه SCB نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش خمش نیم دایره‌ای از دستگاه UTM با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه ا ستفاده شده ا ست [31,33]. تاکنون برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسـفالتی از پارامترهای مختلفی اسـتفاده‌شـده اسـت که در این تحقیق از شـاخص‌های انرژی لازم برای شـکسـت مخلوط‌های آسفالتی و شاخص انعطاف‌پذیری برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است.



شکل ۳ مراحل آماده‌سازی نمونه‌های SCB



شکل ٤ نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه یونیورسال

انرژی لازم برای شکست (Fracture Energy). در این تحقیق به‌منظور ارزیابی ظرفیت کلی مخلوط‌های آسفالتی برای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی از شاخص مقدار انرژی لازم برای شکست استفاده‌شده است که طبق رابطه‌ی زیر از تقسیم سطح زیر منحنی نمودار جابه‌جایی – نیرو به سطح مقطع ترک‌خورده به دست می‌آید.

$$G_f = \frac{W_f}{A} = \int (P) du / A \qquad (۸)$$

در این رابطه G_f برابر با مقدار انرژی لازم برای شکست، W_f برابر باکار لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی (J) و A سطح مقطع ترک‌خورده نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای برحسب (m^2) است.

شاخص انعطاف‌پذیری (Flexibility Index). با توجه به اشاره‌ی تعدادی از پژوهشگران به کافی نبودن پارامتر انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، در این تحقیق علاوه بر انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی از پارامتر شاخص انعطاف‌پذیری به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی تردی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است [29,34].

$$FI = 0.01 * \frac{G_f}{|m|} \quad (۹)$$

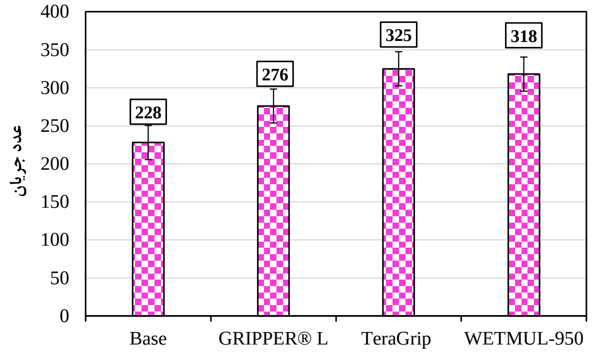
که در این رابطه G_f برابر با مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های اسفالتی (J/m^2)، m برابر با شیب در نقطه‌ی عطف در قسمت دوم منحنی نیرو جابه‌جایی و A ضریب تبدیل واحد و ضریب مقیاس‌گذاری است که در این تحقیق برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته‌شده است.

نتایج و بحث

در این تحقیق خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی (شامل یک مخلوط آسفالتی گرم بدون افزودنی ضد عریان شدگی و ۳ نوع مخلوط آسفالت گرم اصلاح‌شده با افزودنی ضد عریان شدگی مختلف) با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی، تنش کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، خزش دینامیکی و آزمایش خمش نیم دایره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، نتایج خواص مکانیکی هر یک از مخلوط‌های آسفالتی بیان‌شده است.

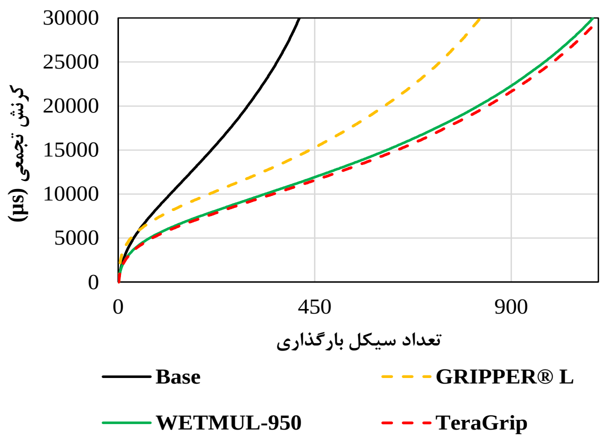
خزش دینامیکی

برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش خزش دینامیکی استفاده‌شده است. نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های اسفالتی مختلف در شکل (۵) نشان داده‌شده است. با توجه به نتایج شکل (۵) می‌توان گفت که افزودن عامل‌های ضد عریان شدگی مقدار عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داده و مقاومت در برابر شیار شدگی را افزایش داده است. به‌طوری‌که افزودن گریپر مقدار عدد روانی را حدود ۲۱٪ افزایش داده که می‌تواند ناشی از ایجاد پیوند کووالانسی قوی بین قیر و مصالح سنگی و افزایش نیروی چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی باشد. از طرفی تراگریپ و وتمول-۹۵۰ به‌عنوان عامل‌های دارای خاصیت پلی آمینی با ایجاد یک سطح آب‌گریز در سطح مصالح سنگی سلیسی مقدار عدد روانی را به ترتیب در حدود ۴۳ و ۴۰ درصد افزایش داده‌اند.



شکل ۵ نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های اسفالتی مختلف

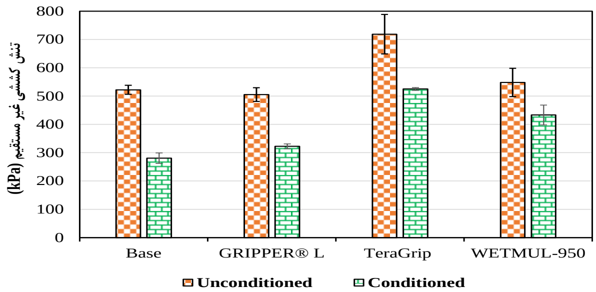
شکل (٦) نمودار کرنش تجمعی- تعداد سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت که به ازای تعداد سیکل بارگذاری یکسان، مقدار کرنش تجمعی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی کمتر شده است. مخلوط آسفالتی حاوی تراگریپ کمترین کرنش تجمعی را در بین افزودنی‌های مختلف از خود نشان داده است. جالب است که مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراگریپ و وتمول -۹۵۰ با توجه به پایه شیمیایی یکسانی که دارند روند تقریباً مشابهی در نمودار تعداد سیکل بارگذاری- کرنش تجمعی از خود نشان داده‌اند.



شکل ٦ نمودار خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف تحت تنش ٤٠٠kPa و دمای ٥٤,٤ درجه‌ی سانتی‌گراد

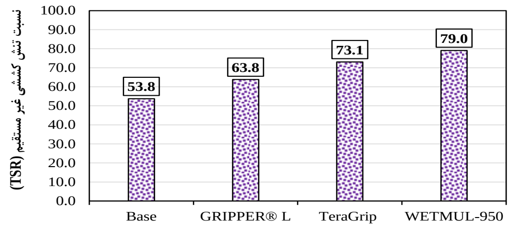
تنش کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

مقدار تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی در حالت تر و خشک در شکل (۷) نشان داده‌شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که استفاده از افزودنی ضد عریان شدگی مقدار تنش کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی را در حالت تر افزایش داده است که این افزایش برای تراگریپ به دلیل واکنش قوی با سطح اسیدی بخصوص مصالح سنگی سیلیسی و ایجاد یک سطح آب‌گریز در سطح مصالح سنگی می‌باشد. اضافه کردن افزودنی‌های تراگریپ و وتمول–۹۵۰ برعکس افزودنی گریپر، مقدار تنش کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی را در حالت خشک نیز افزایش داده است. بیشترین مقدار افزایش تنش کشش غیرمستقیم برای مخلوط آسفالتی در حالت تر و خشک مربوط به مخلوط آسفالتی حاوی تراگریپ به ترتیب با ۸٦/٦٪ و ۷۳/۵٪ درصد افزایش است.



شکل ۷ مقدار تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی در حالت تر و خشک

مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی در شکل (۸) نشان داده‌شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت همان‌طوری که انتظار می‌رفت استفاده از همه‌ی افزودنی‌های مورداستفاده در این پژوهش با توجه به مکانیسم معرفی‌شده در قسمت معرفی افزودنی‌ها، مقدار TSR را افزایش داده است. به عبارت دیگری استفاده از افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول –۹۵۰ به‌عنوان افزودنی ضد عریان شدگی، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را افزایش داده است. بیشترین افزایش مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم برای مخلوط آسفالتی حاوی وتمول–۹۵۰ برابر با ۲۵/۲ است. طبق مطالعات قبلی، به‌منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف، مقدار TSR برابر ۸۰ درصد را به‌عنوان حد مرزی معرفی کرده‌اند[11]. شکل (۸) نشان می‌دهد که مقدار TSR برای ترکیب‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی به مقدار ۸۰ درصد نرسیده و همه‌ی مخلوط‌های آسفالتی مورداستفاده در این پژوهش هنوز مقاومت لازم در برابر حساسیت رطوبتی را ندارند. البته ذکر این نکته نیز مهم است که عوامل مختلفی از قبیل نوع و منبع قیر خالص و مصالح سنگی مورداستفاده می‌تواند نقش مهمی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته باشد [7,35–38].



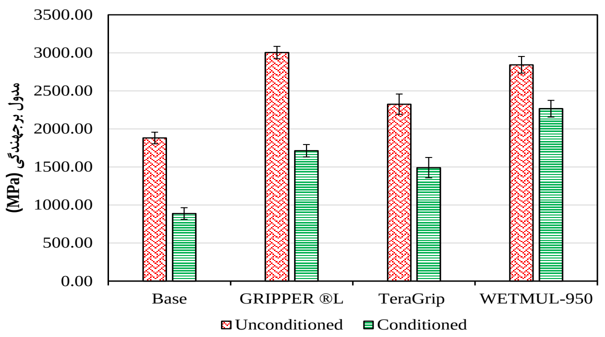
شکل ۸ مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی

مدول برجهندگی و نسبت مدول برجهندگی

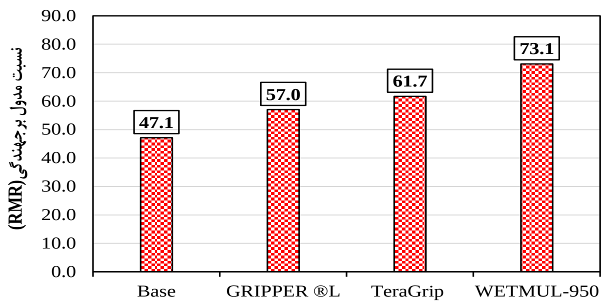
شکل (۹) مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی افزودنی‌های مختلف را در حالت تر و خشک نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت که استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی، به دلیل ایجاد پیوند شیمیایی قوی بین قیر و مصالح سنگی و ایجاد یک سطح آب‌گریز با افزایش مقدار نیروی لازم برای چسبندگی و گسیختگی مقدار مدول برجهندگی را در حالت تر و خشک افزایش داده است. این افزایش مقدار مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی در حالت خشک برای مخلوط حاوی گریپر و در حالت تر برای مخلوط حاوی وتمول –۹۵۰ به ترتیب با ۵۹/۷ و ۱۵٦درصد افزایش بیشترین مقدار را داشته است.

شکل (۱۰) نسبت مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت نسبت مدول برجهندگی (RMR) با نسبت تنش کششی غیرمستقیم (TSR) روند مشابهی دارند. به‌طوری‌که اضافه کردن افزودنی ضد عریان شدگی به مخلوط‌های آسفالتی با توجه به خواص شیمیایی آن‌ها مقدار نسبت مدول برجهندگی را افزایش داده و تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته

است. بیشترین افزایش مقدار نسبت مدول برجهندگی با ۵۵/۲ درصد برای مخلوط حاوی وتمول-۹۵۰ است. افزودنی‌های گریپر و تراگریپ نیز مقدار نسبت مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی را به ترتیب ۲۱ و ۳۱ درصد افزایش داده‌اند. همچنین بسیاری از محققان به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، مقدار ۷۰ درصد را به‌عنوان حد مرزی برای نسبت مدول برجهندگی در نظر گرفته‌اند. بطوریکه هر چه مقدار نسبت مدول برجهندگی از ۷۰ درصد بیشتر باشد، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی بیشتر خواهد بود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد از بین مخلوط‌های آسفالتی مختلف، مخلوط آسفالتی حاوی افزودنی وتمول-۹۵۰ دارای نسبت مدول برجهندگی بالای ۷۳/۱ درصد بوده و مقاومت لازم در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را داراست.



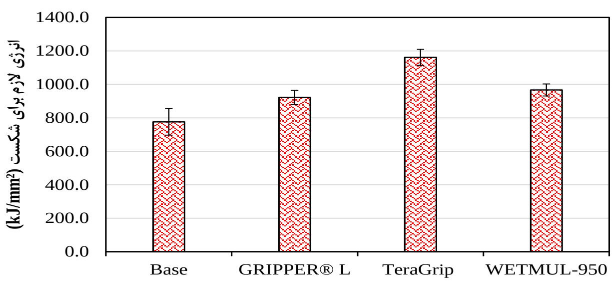
شکل ۹ مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی



شکل ۱۰ نسبت مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

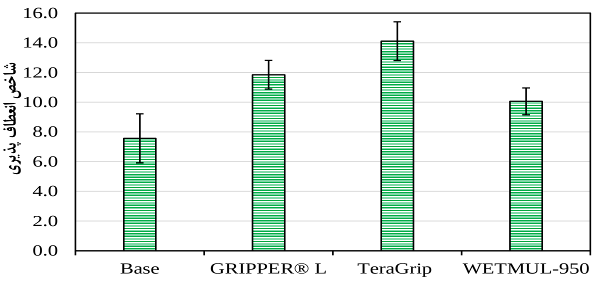
انرژی لازم برای شکست

مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. همان‌طور که شکل (۱۱) نشان می‌دهد با اضافه کردن افزودنی‌های ضد عریان شدگی، با افزایش مقدار انرژی چسبندگی و پیوستگی بین قیر و مصالح سنگی به دلیل خواص شیمیایی آن‌ها مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه‌های ساخته‌شده با این افزودنی‌ها را افزایش داده که برای افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول -۹۵۰ به ترتیب ۱۸/۷، ٤٩/٦و ٢٤/٦ درصد افزایش‌یافته است. از طرفی نتایج آزمایش شکست نشان داد که تراگریپ به دلیل داشتن زنجیر هیدروکربنی بلند در ساختار خود، سازگاری بیشتری با قیر داشته و باعث بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی‌شده و درنتیجه منجر به افزایش مقدار انرژی لازم برای شکست و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی شده است.



شکل ۱۱ مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

شکل (۱۲) شاخص انعطاف‌پذیری را برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی مختلف نشان می‌دهد. طبق این شکل، اصلاح قیر با عامل‌های ضد عریان شدگی انعطاف‌پذیری قیرهای اصلاح‌شده را افزایش داده بطوریکه گریپر و تراگریپ و وتمول-۹۵۰ مقدار این شاخص را به ترتیب ۵۵/۳، ۸۵/۵ و ۳۲/۹ درصد افزایش داده‌اند که این افزایش می‌تواند ناشی از خواص شیمیایی خاص ذکرشده برای هر یک از عامل‌های مورداستفاده در این پژوهش باشد. به عبارتی در این تحقیق استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی، مقدار شاخص انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داده است.



شکل ۱۲ شاخص انعطاف‌پذیری برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

همبستگی بین نتایج آزمایش‌های عملکردی

به‌منظور شناسایی و بررسی رابطه بین نتایج آزمایش‌های مختلف انجام‌گرفته با یکدیگر، می‌توان از شاخص‌هایی مانند کوواریانس و همبستگی استفاده کرد که در این تحقیق از ضریب همبستگی به‌منظور بررسی همبستگی بین نتایج آزمایش استفاده‌شده است. شاخص همبستگی بین دو متغیر همواره عددی بین ۱ و ۱- است. هرچقدر این ضریب به عدد ۱ و ۱- نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که دو متغیر باهم رابطه‌ی بیشتری داشته و در هم تنیدگی داده‌ها بیشتر است (در حالت مثبت رابطه مستقیم و در حالت منفی رابطه معکوس دارند). به عبارت دیگری اگر ضریب همبستگی بین دو پارامتر موردبررسی عددی مثبت باشد بدین معناست که با افزایش پارامتر اول، پارامتر دوم هم افزایش خواهد یافت و بالعکس. منفی بودن ضریب همبستگی بین دو پارامتر نیز نشان می‌دهد که با افزایش مقدار یک پارامتر مقدار پارامتر دوم کاهش خواهد یافت. همچنین درصورتی‌که این مقدار به صفر نزدیک باشد، آنگاه می‌توان گفت رابطه معناداری بین دو متغیر وجود ندارد. در جدول (۳) ضرایب همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های آسفالتی مختلف (پارامترهای خروجی آزمایش‌های مکانیکی صورت گرفته: نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)، نسبت مدول برجهندگی (RMR)، عدد روانی (FN)، انرژی لازم برای شکست (FE) و شاخص انعطاف‌پذیری (FI)) بررسی‌شده است. همان‌طوری که جدول (۳) نشان می‌دهد، بین نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برای حالت مختلف مخلوط آسفالتی، ضرایب همبستگی عددی غیر صفر بوده است که به‌طورکلی نشان‌دهنده‌ی همبستگی بیشتر بین آزمایش‌های انجام‌شده در مخلوط‌های آسفالتی مختلف می‌باشد. ضریب همبستگی بین پارامتر TSR و RMR با ۰/۹۷۴ بیشترین مقدار را داشته و بیشترین همبستگی بین این دو آزمایش می‌باشد. از طرفی همبستگی بین آزمایش نسبت مدول برجهندگی و شاخص انعطاف‌پذیری با ۰/۳۸۴ کمترین ضریب همبستگی رابین پارامترهای مختلف داشته است.

جدول ۳ نتایج تحلیل همبستگی بین پارامترهای مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف

	FN	TSR	RMR	FE	FI
FN	۱				
TSR	۰/۹۵۷۸۵۲	۱			
RMR	۰/۸۷۲۶۰۴	۰/۹۷۴	۱		
FE	۰/۹۰۵۱۶۵	۰/۷۴۸۲۳۲	۰/۵۸۲۶۰۳	۱	
FI	۰/۷۵۸۲۸۵	۰/۵۴۹۶۴	۰/۳۸۴۱۷۲	۰/۹۱۹۴۱۳	۱

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی تأثیر استفاده از افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰ به‌عنوان مواد افزودنی ضد عریان شدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی داغ پرداخته‌شده است. بدین منظور از آزمایش‌های مکانیکی مختلف نظیر خزش دینامیکی در دمای ۵۴/۴ درجه‌ی سانتی‌گراد، آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد استفاده گردید. در ادامه خلاصه نتایج عملکرد نمونه‌های مختلف بیان‌شده است:

۱. مطابق نتایج آزمایش خزش دینامیکی، افزودنی‌های مورداستفاده در این تحقیق با افزایش مقدار عدد روانی و کاهش کرنش تجمعی به ازای سیکل بارگذاری یکسان، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده را در برابر شیار شدگی افزایش داده‌اند.

۲. نتایج آزمایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد به‌طورکلی افزودنی‌های ضد عریان شدگی مقدار مدول برجهندگی و مقاومت کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده را در حالت تر و خشک افزایش داده است.

۳. به‌طورکلی اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با افزودنی‌های مورداستفاده در این پژوهش با افزایش مقدار TSR مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت در برابر خرابی حساسیت رطوبتی را افزایش

داده است. بطوریکه از بین افزودنی‌های مختلف، وتمول-۹۵۰ با ۲۵/۲ درصد افزایش بیشترین تأثیر بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را داشته است.

٤. مقایسه نسبت مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف نشان داد نسبت مدول برجهندگی (RMR) با نسبت تنش کششی غیرمستقیم (TSR) روند مشابهی داشته و افزودنی‌های ضد عریان شدگی تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی دارند.

٥. مطابق نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای، اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی گریپر، تراگریپ و وتمول -۹۵۰ مقدار انرژی لازم برای شکست و شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های اسفالتی اصلاح‌شده را افزایش داده است.

٦. آنالیز همبستگی بین نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد بین مدول برجهندگی، عدد روانی، مقاومت کششی غیرمستقیم، انرژی لازم برای شکست و شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی، همبستگی و ارتباط بیشتری وجود دارد. به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین پارامتر TSR و RMR با ۰/۹۷٤ بیشترین همبستگی رابین پارامترهای مختلف آزمایش‌های عملکردی دارند.

مراجع

1. Ameri, M., Kouchaki, S., Roshani, H., "Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze–thaw cycles", *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 1009–1016, (2013).
2. Ameri, M., Vamegh, M., Farhad, S., Naeni, C., Molayem, M., "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik , Zycotherm and hydrated lime", *Construction and Building Materials*, Vol. 165, pp. 958–965, (2018).
3. Ameri, M., Ziari, H., Yousefi, A., Behnood, A., "Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Thermodynamic Evaluation of the Effects of Antistripping Additives", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. Eng. 33(2), 4020457, (2021).
4. Behnood, A., "A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 259, 120817, (2020).
5. Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., "Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders", *European Polymer Journal*, Vol. 112, pp. 766–791, (2019).
6. Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., Gozali Asl, F., Ameri, M., "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 96, pp. 172–180, (2015).
7. Bhasin, A., Masad, E., Little, D., Lytton, R., "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage", *Transportation Research Record*, Vol. 1970(1), pp. 2–13, (2006).
8. Bidgoli, M.A., Naderi, K., Nejad, F.M., "Effect of Filler Type on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using Mechanical and Thermodynamic Properties", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 31(4), pp. 1–10, (2019).
9. Buss, A., Cascione, A., Williams, R.C., "Evaluation of warm mix asphalt containing recycled asphalt shingles", *Construction and Building Materials*, Vol. 61, pp. 1–9, (2014).
10. Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M., "The Superpave mix design manual for new

construction and overlays", No. SHRP-A-407, Washingtom, DC: Strategic Highway Research Program, (1994).

11. Fakhri, M., Azami, A., "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber", *Journal of Cleaner Production,* Vol. 165, pp. 1125–1132, (2017).
12. Gorkem, C., Sengoz, B., "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", *Construction and Building Materials,* Vol. 23, pp. 2227–2236, (2009).
13. Guo, N., You, Z., Zhao, Y., Tan, Y., Diab, A., "Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures", *Construction and Building Materials,* Vol. 64, pp. 141–149, (2014).
14. Haghshenas, H.F., Rea, R.C., Reinke, G., Yousefi, A., Haghshenas, D.F., Ayar, P., "The Effect of Recycling Agents on the Resistance of Asphalt Binders to Cracking and Moisture Damage", *Journal of Materials in Civil Engineering,* 33(10), p.04021292, (2021).
15. Hamedi, G. H., Moghadas Nejad, F., & Oveisi, K., "Road Materials and Pavement Design Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA", *Road Materials and Pavement Design,* Vol. 37–41, (2015).
16. Kakar, M.R., Hamzah, M.O., Akhtar, M.N., Woodward, D., "Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive", *Journal of Cleaner Production,* Vol. 112, pp. 2342–2353, (2016).
17. Karahancer, S., Eriskin, E., Saltan, M., Terzi, S., Akbas, M.Y., Cengizhan, A., "Moisture Susceptibility of Nano-Al2O3 and SiO2 Modified Asphalt Mixtures, in: Airfield and Highway Pavements 2019: Testing and Characterization of Pavement Materials", *American Society of Civil Engineers Reston,* VA, pp. 127–135, (2019).
18. Kavussi, A., Qorbani, M., Khodaii, A., Haghshenas, H.F., "Moisture susceptibility of warm mix asphalt: a statistical analysis of the laboratory testing results", *Construction and Building Materials,* Vol. 52, pp. 511–517, (2014).
19. Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von Quintus, H., Moulthrop, J.S., "Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program", (1994).
20. Khodaii, A., Kazemi Tehrani, H., Haghshenas, H.F., "Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt", *Construction and Building Materials,* Vol. 36, pp. 165–170, (2012).
21. Kok, B.V., Yilmaz, M., "The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials,* Vol. 23(5), pp. 1999–2006, (2009).
22. Little, D.N., Jones, D.R., "Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements", National Seminar on Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, Vol. pp. 37–70, (2003).
23. Mirzababaei, P., "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations", *Construction and Building Materials,* Vol. 116, pp. 403–412, (2016).
24. Nakhaei, M., Naderi, K., Akbari, A., Timm, D.H., "Moisture resistance study on PE-wax and EBS-wax modified warm mix asphalt using chemical and mechanical procedures Moisture resistance study on PE-wax and EBS-wax modified warm mix asphalt using chemical and mechanical procedures", *Construction and Building Materials,* Vol. 189, (November), pp. 882–889, (2018).

25. Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P., Doll, B., "Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters", *Construction and Building Materials,* Vol. 115, pp. 390–40, (2016).
26. Pirmohammad, S., Khanpour, M., "Fracture strength of warm mix asphalt concretes modified with crumb rubber subjected to variable temperatures", *Road Materials and Pavement Design,* Vol. 1–19, (2020).
27. Shafabakhsh, G.H., Faramarzi, M., Sadeghnejad, M., "Use of Surface Free Energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents", *Construction and Building Materials,* Vol. 98, pp. 456–464, (2015).
28. Sobhi, S., yusefi, A., hesami, S., Ameri, M., "An investigation of factors affecting the moisture sensitivity of warm mix asphalt (WMA) ", *Amirkabir Journal of Civil Engineering,* Vol. 52(1), pp. 187–212, (2020).
29. Wang, W., Wang, L., Xiong, H., Luo, R., "A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure", *Construction and Building Materials,* Vol. 204, pp. 631–642, (2019).
30. Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T., Amirkhanian, S.N., "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures", *Construction and Building Materials,* Vol. 22(10), pp. 1047–1055, (2010).
31. Yousefi, Afshar, Behnood, A., Nowruzi, A., Haghshenas, H., "Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP) ", *Construction and Building Materials,* Vol. 121200, (2020).
32. yousefi, A., Nowruzi, A, yousefi, Y., Sobhi, S., "Evaluation of the effect of loading rate of Semicircular Bending test on different fracture mechanical parameters of asphalt mixtures at intermediate temperature", *Journal of Transportation Research,* Vol. 19(1), pp. 163-176, (2020).
33. Yousefi, A, Pirmohammad, S., Sobhi, S., "Fracture Toughness of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement", *Journal of Stress Analysis,* Vol. 5(1), pp. 85–98, (2020).
34. Yousefi, A.A., Sobhi, S., Aliha, M.R.M., Pirmohammad, S., Haghshenas, H.F., "Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes", *Construction and Building Materials,* Vol. 300, 124130, (2021).
35. Zhdanov, S.P., Kosheleva, L.S., Titova, T.I., "IR study of hydroxylated silica", *Langmuir,* Vol. 3(6), 960–967, (1987).
36. Zhu, C., Tang, J., Zhang, H., Duan, H., "Effect of liquid anti-stripping agents on moisture sensitivity of crumb rubber modified asphalt binders and mixtures", *Construction and Building Materials,* Vol. 225, pp. 112–119, (2019).
37. Zumrawi, M.M.E., Edrees, S.A.S.,. "Comparison of Marshall and Superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes", *International Journal of Scientific and Technical Advancements,* Vol. 2(1), pp. 29–35, (2016).
38. Ziari, H., Orouei, M., Divandari, H., Yousefi, A., "Mechanical Characterization of Warm Mix Asphalt Mixtures Made with RAP and Para-fiber additive", *Construction and Building Materials,* Vol. 279, 122456. (2021).